

CENTRO UNIVERSITÁRIO SAGRADO CORAÇÃO – UNISAGRADO

MARIA EDUARDA LINGO DE ALMEIDA

COLHEITA AUTOMATIZADA DE PLANTAS POR BRAÇO ROBÓTICO E  
PROCESSAMENTO DE IMAGEM EMBARCADO.

BAURU

2024

MARIA EDUARDA LINGO DE ALMEIDA

COLHEITA AUTOMATIZADA DE PLANTAS POR BRAÇO ROBÓTICO E  
PROCESSAMENTO DE IMAGEM EMBARCADO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de bacharel em Ciência da Computação -  
Centro Universitário Sagrado Coração.

Orientador: Prof. Dr. Elvio Gilberto da Silva e  
Prof. Me. Roque Maitino Neto.

BAURU

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

A447c

Almeida, Maria Eduarda Lingo de

Colheita automatizada de plantas por braço robótico e processamento de imagem embarcado / Maria Eduarda Lingo de Almeida. -- 2024.

25f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Elvio Gilberto da Silva

Coorientador: Prof. M.e Roque Maitino Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) - Centro Universitário Sagrado Coração - UNISAGRADO - Bauru - SP

1. Processamento de imagens. 2. Visão Computacional. 3. Sistemas embarcados. 4. IoT. 5. Robótica. I. Silva, Elvio Gilberto da. II. Maitino Neto, Roque. III. Título.

MARIA EDUARDA LINGO DE ALMEIDA

COLHEITA AUTOMATIZADA DE PLANTAS POR BRAÇO ROBÓTICO E  
PROCESSAMENTO DE IMAGEM EMBARCADO.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
título de bacharel em Ciência da Computação -  
Centro Universitário Sagrado Coração.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Elvio Gilberto da Silva (Orientador) e Prof. Me. Roque Maitino Neto (Orientador)  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof. Me. Saulo Silva Coelho  
Centro Universitário Sagrado Coração

---

Prof. Me. Henrique Pachioni Martins  
Centro Universitário Sagrado Coração

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, a minha família, aos meus sonhos e a todos que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama das etapas referentes a processamento de imagem.....	12
Figura 2 - Placa desenvolvida.....	15
Figura 3 - Esquemático da placa.....	15
Figura 4 - Detecção de tomates prontos para serem retirados da planta (tomates vermelhos) simultaneamente em ambas webcams.....	17
Figura 5 - Valores intrínsecos e extrínsecos extraídos de ambas webcams.....	18
Figura 6 - Braço robótico desligado frontal.....	20
Figura 7 - Braço robótico desligado lateral.....	20
Figura 8 - Braço robótico ligado lateralmente simulando a detecção e captura de objetos.....	22
Figura 9 - Braço robótico ligado frontal simulando a detecção e captura de objetos.....	22
Figura 10 - Impressão 3D das peças estruturais do braço robótico.....	23
Figura 11 - Impressão 3D detalhada das peças estruturais do braço robótico 3D das peças estruturais do braço robótico.....	23

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>12</b>
3.1 VISÃO COMPUTACIONAL E O PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	12
3.2 SISTEMAS EMBARCADOS E IOT.....	13
3.3 ROBÓTICA.....	14
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>15</b>
4.1 MICROCONTROLADOR E DEMAIS HARDWARES.....	15
4.2 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO.....	16
4.3 BIBLIOTECAS E FRAMEWORKS.....	17
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
5.1 PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	17
5.2 MANIPULADOR ROBÓTICO.....	20
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>25</b>

## RESUMO

Ao longo do tempo, a tecnologia se consolidou como um dos pilares fundamentais da sociedade moderna, gerando impactos significativos em diversos setores e transformando a forma como vivemos. Áreas tecnológicas como: Visão Computacional, Internet das Coisas (IoT) e robótica desempenham um papel importante nessa revolução tecnológica, desenvolvendo soluções que otimizam e automatizam tarefas, além de possibilitar a tomada de decisões de forma autônoma. A crescente demanda por dispositivos inteligentes que combinam otimização, autonomia e mobilidade reflete não apenas necessidades industriais, mas também o interesse da população em geral por tecnologias que aproximam máquinas das capacidades humanas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema robótico integrado que combina essas áreas tecnológicas, com o objetivo de impactar principalmente o setor agrícola. O produto desenvolvido consiste em um braço robótico equipado com processamento de imagem com capacidade de realizar tarefas de manipulação com foco em aplicações agrícolas, como colheitas automatizadas. Ao longo desta monografia, são apresentados os conceitos e tecnologias envolvidos, bem como resultados preliminares e finais. Os resultados serão expostos até o limite que não comprometa a propriedade intelectual do produto.

Palavras-chave: Processamento de imagens; Visão computacional; Sistemas embarcado; IoT; Robótica.



## **ABSTRACT**

Over time, technology has established itself as one of the fundamental pillars of modern society, generating significant impacts across various sectors and transforming the way we live. Technological fields such as Computer Vision, the Internet of Things (IoT), and robotics play a crucial role in this technological revolution by developing solutions that optimize and automate tasks while enabling autonomous decision-making. The growing demand for intelligent devices that combine optimization, autonomy, and mobility reflects not only industrial needs but also the general population's interest in technologies that bring machines closer to human capabilities. This work presents the development of an integrated robotic system that combines these technological areas, aiming to significantly impact the agricultural sector. The developed product consists of a robotic arm equipped with image processing capabilities, designed to perform manipulation tasks focused on agricultural applications, such as automated harvesting. Throughout this monograph, the concepts and technologies involved are presented alongside preliminary and final results. The results will be disclosed to the extent that they do not compromise the product's intellectual property.

Keywords: Image processing; Computer vision; Embedded systems; IoT ; Robotics.

## 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia tem desempenhado um papel crucial na sociedade, permitindo avanços cada vez maiores em inúmeros setores e no dia a dia da população mundial. Áreas como: Visão Computacional, Internet das Coisas (IoT) e robótica impulsionam cada vez mais essa evolução, possibilitando a criação de dispositivos parcialmente ou totalmente autônomos, capazes de tomar decisões sem a necessidade de interação humana, decisões essas que podem ser aplicadas em diversos segmentos como desde da indústria automotiva até automações residenciais, ou seja, promovendo benefícios tanto para empresas quanto para a população em geral. Embora cada uma dessas áreas tecnológicas pertencentes ao desenvolvimento desse trabalho possuam objetivos e propósitos distintos quando integrados, podem mudar totalmente o cenário de qualquer segmento existente.

O setor agrícola é um dos principais campos onde a tecnologia tem uma maior aplicabilidade e conseqüentemente gera um grande impacto, dado o constante desafio de otimizar processos e aumentar a produtividade nesse setor. No Brasil, conhecido como um dos grandes exportadores alimentícios do mundo, a aplicabilidade ganha ainda mais destaque pois existe uma constante busca por automação e soluções tecnológicas inteligentes que possam tomar decisões com base em informações já pré-dispostas, como por exemplo: dispositivos com capacidade de voar que fazem dispersão de sementes.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema robótico autônomo, integrando conceitos de Visão Computacional, IoT e Robótica, com foco na automação agrícola. O sistema consiste em um braço robótico, capaz de identificar e manipular objetos com o auxílio de processamento de imagens e aprendizado de máquina, permitindo ações mais eficientes como: fazer colheitas. Nesta monografia, são explorados os fundamentos teóricos que sustentam esse produto, bem como os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um produto capaz de exercer as mesmas funções que um ser humano exerce ao fazer colheitas agrônômicas, o responsável pelo feito sendo o manipulador robótico com integração da visão computacional.

## **3 REVISÃO DE LITERATURA**

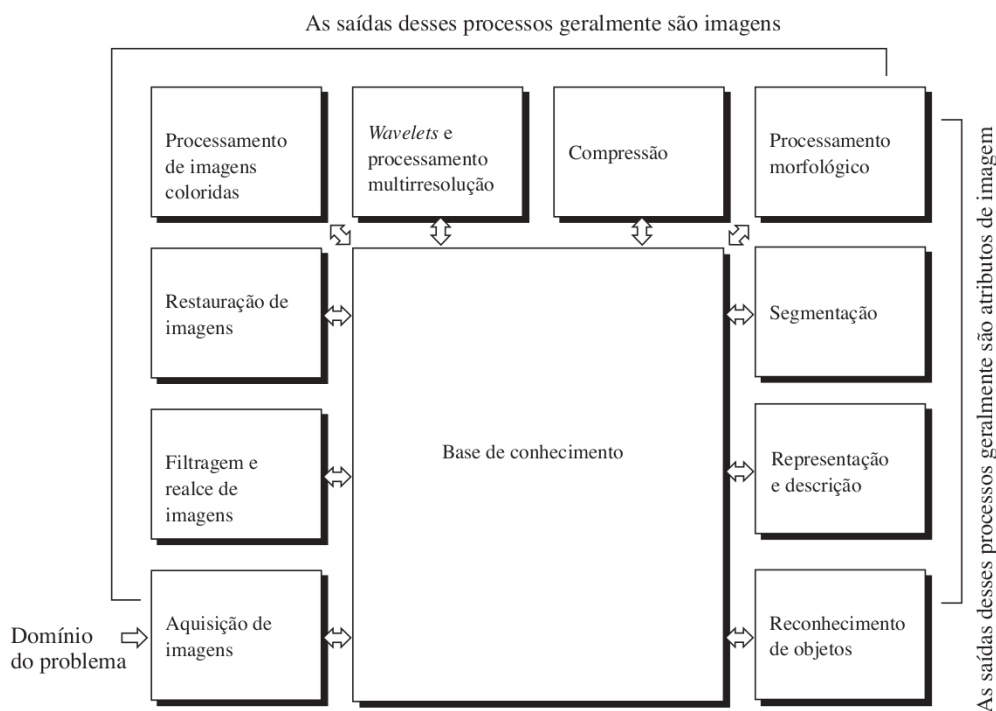
### **3.1 VISÃO COMPUTACIONAL E O PROCESSAMENTO DE IMAGEM**

Os primeiros computadores poderosos o suficiente para realizar tarefas de processamento de imagens significativas foram desenvolvidos no início da década de 1960. O advento do processamento digital de imagens dependeu da disponibilidade dessas máquinas e do início do programa espacial durante esse período[...], o emprego de técnicas computacionais para melhoramento de imagens produzidas por uma sonda espacial teve início no Jet Propulsion Laboratory (Pasadena, Califórnia) em 1964, quando figuras da Lua transmitidas pelo Ranger 7 foram processadas por um computador para corrigir vários tipos de distorções de imagem inerentes à câmera de televisão a bordo (Gonzalez; Woods, 2010, p.3)

Paralelamente a essas aplicações espaciais, técnicas de processamento digital de imagens começaram a ser desenvolvidas no final da década de 1960 e início da década de 1970 para serem utilizadas em imagens médicas, nas observações remotas de recursos da Terra e na astronomia (Gonzalez; Woods, 2010, p.3).

O processamento de imagem e sinais é formado de várias etapas para que seja possível no final extrair informações significativas para inúmeros projetos, inclusive o desenvolvimento de partes deste produto. Abaixo, a Figura 1, representa um diagrama macro das etapas necessárias para que se transformem as imagens e vídeos em dados:

Figura 1 - Diagrama das etapas referentes a processamento de imagem



Fonte: (Gonzalez; Woods, 2010, p. 16).

Paralelamente, “A visão computacional é um campo da inteligência artificial (IA) que utiliza aprendizado de máquina e redes neurais para ensinar computadores e sistemas a extrair informações significativas de imagens digitais, vídeos e outros dados visuais — e a fazer recomendações ou tomar ações quando identificarem defeitos ou problemas”(IBM, tradução nossa).

Ambos conceitos - Processamento de Imagem e Visão Computacional - detêm um grande impacto nesse trabalho, a função de ambos é realizar a primeira etapa do projeto: detecção dos objetos a serem manipulados nos frames e conseqüentemente a extração das informações deste objeto, como por exemplo: coordenadas da localização 2D do item.

### 3.2 SISTEMAS EMBARCADOS E IOT

Sistemas embarcados são uma parte fundamental da tecnologia moderna, desempenhando um papel crucial em uma ampla gama de dispositivos e aplicações. Eles são sistemas de computador especializados, projetados para realizar tarefas ou funções dedicadas, frequentemente com restrições de tempo real, em contraste com os computadores de uso geral. Sistemas embarcados estão presentes em dispositivos do cotidiano, como smartphones, micro-ondas, máquinas de lavar, dispositivos médicos, sistemas de controle automotivo e equipamentos de automação industrial.

Eles são responsáveis por gerenciar e controlar diversos aspectos desses dispositivos, desde o processamento de dados de sensores até o acionamento de atuadores e garantindo o funcionamento adequado do sistema (David, 2023, p.59-60, tradução nossa).

Paralelamente, a 4<sup>o</sup> revolução industrial proporcionou o surgimento da Internet das Coisas (IoT) que conecta dispositivos e sistemas à internet transformando os mesmos em dispositivos inteligentes, como por exemplo: o envio de telemetria de um dispositivo para servidores e a disponibilização destes dados em dashboards online.

A premissa básica e o objetivo da Internet das Coisas (IoT) é "conectar o que está desconectado". Isso significa que objetos que atualmente não estão conectados a uma rede de computadores, ou seja, à Internet, serão conectados para que possam se comunicar e interagir com pessoas e outros objetos. A IoT é uma transição tecnológica na qual dispositivos nos permitirão perceber e controlar o mundo físico, tornando os objetos mais inteligentes e conectando-os através de uma rede inteligente (Hanes et al., 2017, p.3, tradução nossa).

Os sistemas embarcados são uma parte essencial de um ecossistema IoT, os sistemas fornecem os componentes básicos para o funcionamento da Internet das Coisas, como: sensores que fazem a coleta de dados e processadores com poder de analisar e executar ações caso haja a necessidade.

### 3.3 ROBÓTICA

A história moderna da manipulação robótica remonta ao final da década de 1940, quando braços servomecanismos foram desenvolvidos em conexão com sistemas de manipuladores mestre-escravo usados para proteger os técnicos no manuseio de materiais nucleares" (Siciliano; khatib, 2016, tradução nossa).

Desde o surgimento da robótica, a mesma vem mudando todo cenário tecnológico com foco industrial porém nos dias atuais ganha cada vez mais espaço na sociedade e no cotidiano da população geral. A robótica é uma área multidisciplinar que combina conhecimentos de engenharia, computação, matemática e ciências naturais para projetar, construir e programar sistemas capazes de realizar tarefas de forma autônoma ou semi autônoma. A robótica que antes somente era aplicada a cenários indústrias e para segmentos restritos, atualmente é facilmente encontrada aplicada a diversos segmentos sejam eles de cunho industrial ou não.

Entre as aplicações da robótica, uma das áreas que ganha cada vez mais dispositivos para o seu uso é a área agrônômica visando a automatização de diversos processos e desenvolvimentos de novas tecnologias para suprir as necessidades que surgem cada dia mais.

No contexto deste projeto, a robótica é a tecnologia que será a integradora entre o processamento de imagem e o IoT para que seja possível alcançar resultados que sistemas tradicionais não conseguiriam. A utilização de um braço robótico programado para realizar colheitas automatizadas permite atender a demandas do setor agrícola por produtividade e eficiência. Além disso, o uso da robótica contribui para minimizar desperdícios e reduzir a necessidade de intervenção humana, garantindo maior precisão em operações agrícolas críticas.

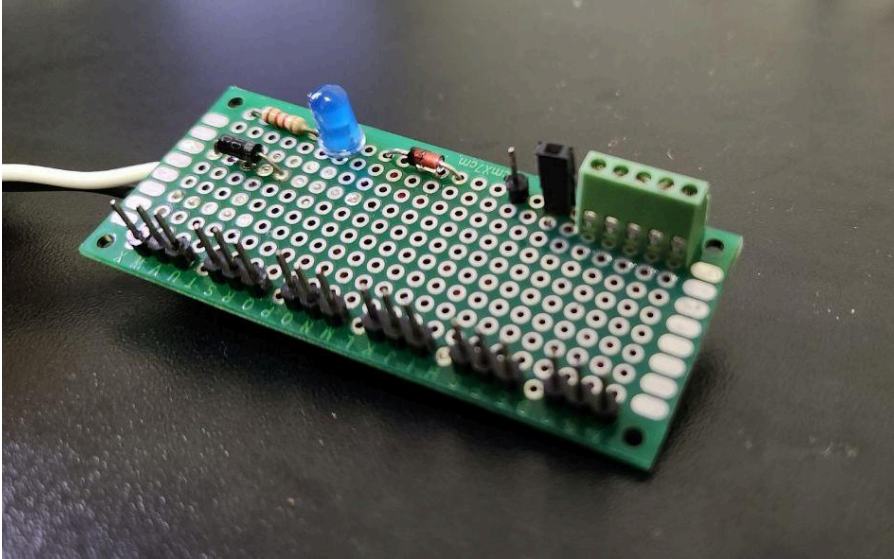
## 4 METODOLOGIA

### 4.1 MICROCONTROLADOR E DEMAIS HARDWARES

O microcontrolador escolhido foi o ESP32, essa escolha se deu devido a necessidade de um microcontrolador com alto poder de processamento, memória que permita a implementação de comunicação com a internet (Wi-Fi ou Ethernet) e que tenha tecnologias como: atualizações remotas que permitem que o produto seja atualizado para futuras novas implementações e possíveis correções de bug estabelecendo uma maior vida útil para o produto.

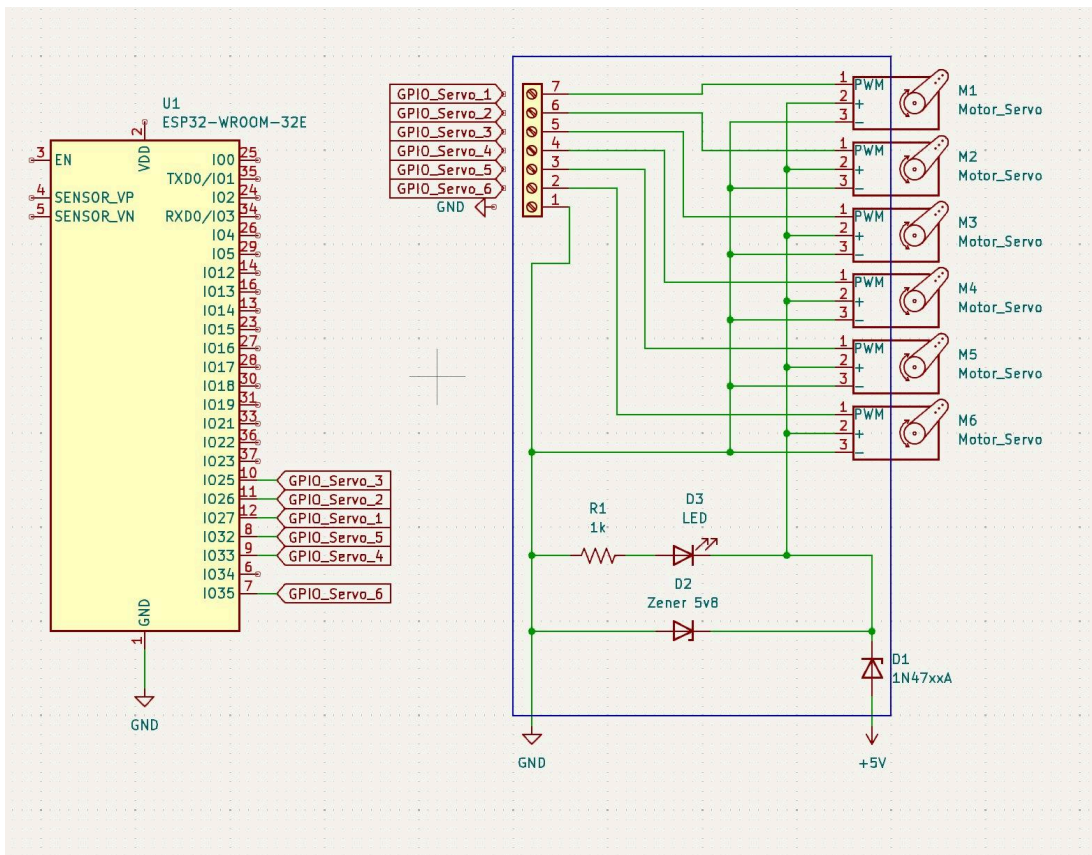
O manipulador robótico foi construído com base em servos motores, sendo estes o modelo: TD-8120MG, variando somente a carga suportada por cada, sendo estas: 20 e 30 Kg e o manipulador contém com duas webcams paralelas inseridas na estrutura. Para a alimentação do manipulador, foi utilizado uma fonte genérica de 5V e 10A de potência. Além disso, foi desenvolvido uma placa (Figura 2) com o objetivo de interligar esses equipamentos: fonte, servos motores e microcontrolador em um único espaço, organizando o projeto, facilitando a conexão e envio de dados entre todos. A figura 3 apresenta o esquemático da placa desenvolvida.

Figura 2 - Placa desenvolvida



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 3 - Esquemático da placa



Fonte: Elaborada pela autora.

## 4.2 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO

Para o desenvolvimento do produto foi usado duas linguagens de programação, sendo estas: C/C++ para o desenvolvimento do código executado no microcontrolador ESP32 referente a manipulação dos servos motores e Python para o desenvolvimento das etapas envolvendo a detecção de objeto e transformadas de coordenadas em ângulos que foram enviados para o microcontrolador realizar a manipulação.

### 4.3 BIBLIOTECAS E FRAMEWORKS

Para o processamento de imagem e todas as tecnologias periféricas ao tema foi utilizado a biblioteca OpenCV. Paralelamente para a aplicação de conceitos matemáticos e robóticos que foram usados para a configuração e manipulação do braço robótico, foi utilizado o framework ROS2. Para o controle dos servos foi utilizado o framework ESP-IDF.

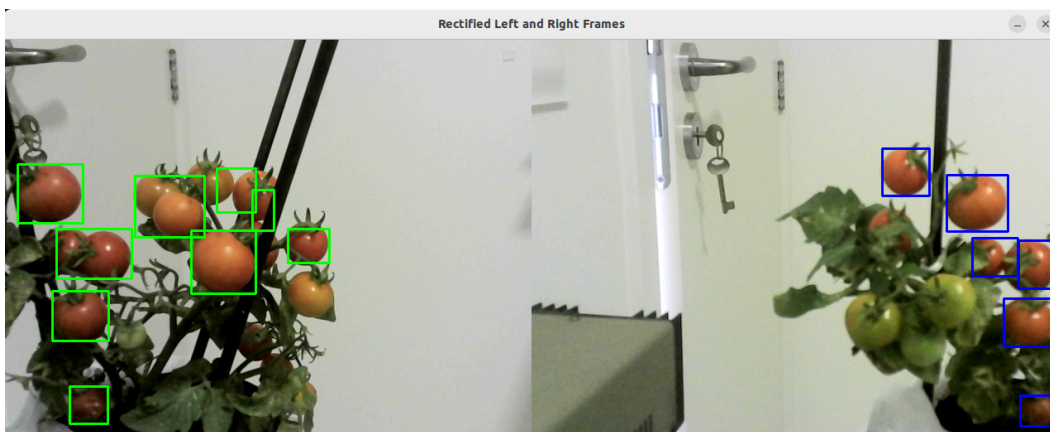
## 5 RESULTADOS

### 5.1 PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O manipulador robótico contém inserido na sua estrutura duas webcams genéricas que tem como objetivo capturar imagens de acordo com a posição do manipulador, após a captura é feito processamento de imagens em cima dos frames capturados com a intenção de detectar objetos (Figura 4), neste caso “objetos” de cunho agrônômicos, e extrair as posições (x, y, z) do mesmo.



Figura 4 - Detecção de tomates prontos para serem retirados da planta (tomates vermelhos) simultaneamente em ambas webcams



Fonte: Elaborada pela autora.

Para alcançar os resultados de detecção e extração de posições, as webcams foram estrategicamente posicionadas no manipulador robótico, configurando um ambiente estéreo que permitiu a triangulação das posições dos objetos comuns encontrados nos frames. A partir desse processo, foram determinadas as coordenadas tridimensionais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) dos objetos. Paralelamente, as webcams passaram por um processo de calibração, no qual foram obtidos seus parâmetros intrínsecos e extrínsecos (Figura 5), como os valores de distorção da lente. Esses parâmetros são essenciais para corrigir as distorções dos frames capturados, garantindo que a extração final das coordenadas dos objetos seja realizada com o máximo de precisão possível.

Figura 5 - Valores intrínsecos e extrínsecos extraídos de ambas webcams

```
mtx_left: !!opencv-matrix
  rows: 3
  cols: 3
  dt: d
  data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ]
dist_left: !!opencv-matrix
  rows: 1
  cols: 5
  dt: d
  data: [ 0., 0., 0., 0., 0. ]
mtx_right: !!opencv-matrix
  rows: 3
  cols: 3
  dt: d
  data: [ 1., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1. ]
dist_right: !!opencv-matrix
  rows: 1
  cols: 5
  dt: d
  data: [ 0., 0., 0., 0., 0. ]
T: !!opencv-matrix
  rows: 3
  cols: 1
  dt: d
  data: [ 2.1140927057321423e+02, 2.8182214692803250e+01,
         1.3314987541883161e-01 ]
```

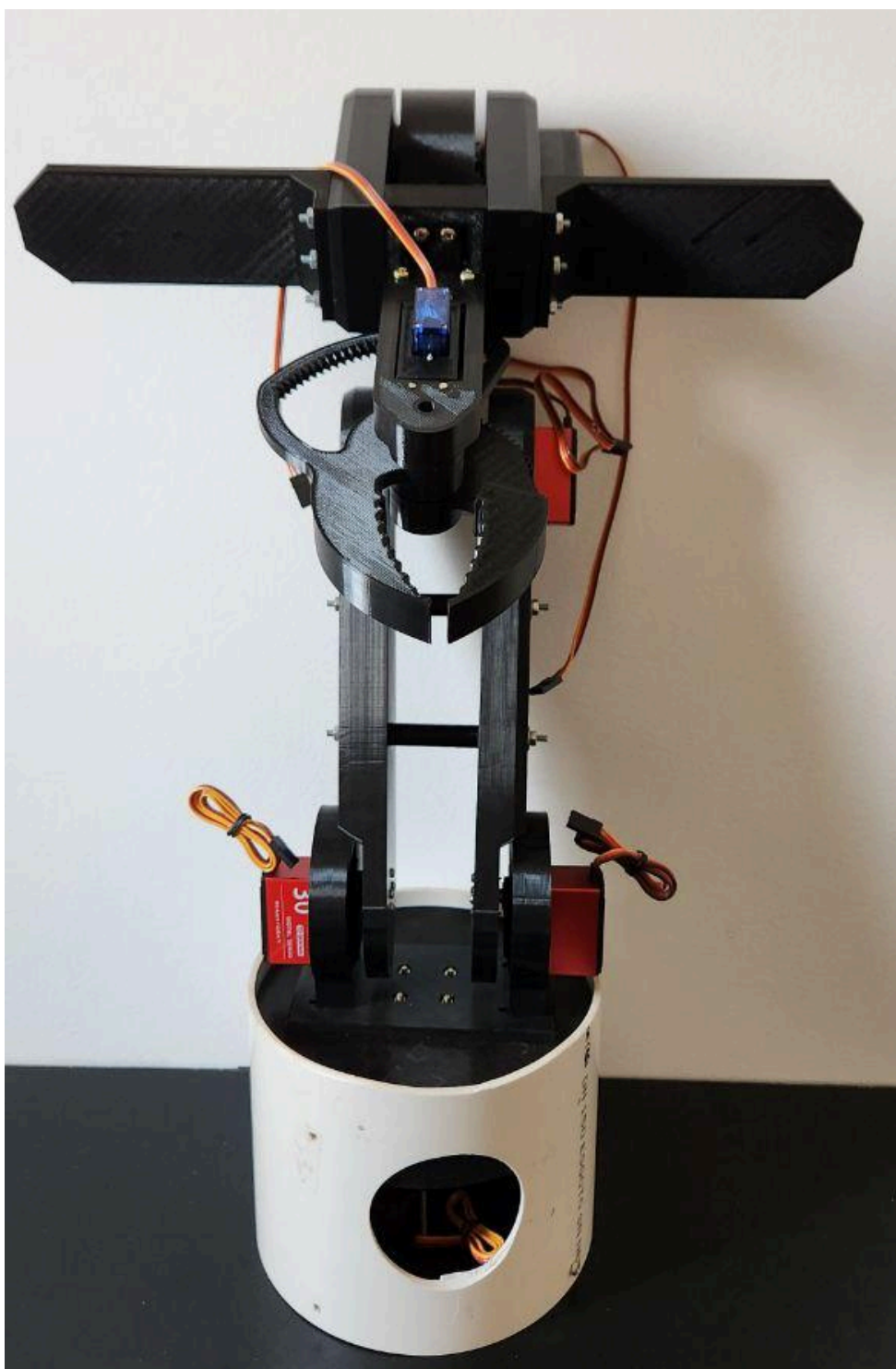
Fonte: Elaborada pela autora.

Além disso, durante o desenvolvimento e os testes do projeto, foi constatado que o erro médio na precisão do alcance do manipulador robótico em relação às coordenadas extraídas do processamento de imagem e calibrações realizadas, foi de aproximadamente 2 cm. Embora esse valor seja considerado elevado, ele indica uma margem de melhoria significativa. Diversas alternativas e estratégias podem ser exploradas para aumentar a acurácia das coordenadas reais do objeto identificado, estes aprimoramentos serão implementados visto que o desenvolvimento deste projeto não se encerra nesta monografia.

## 5.2 MANIPULADOR ROBÓTICO

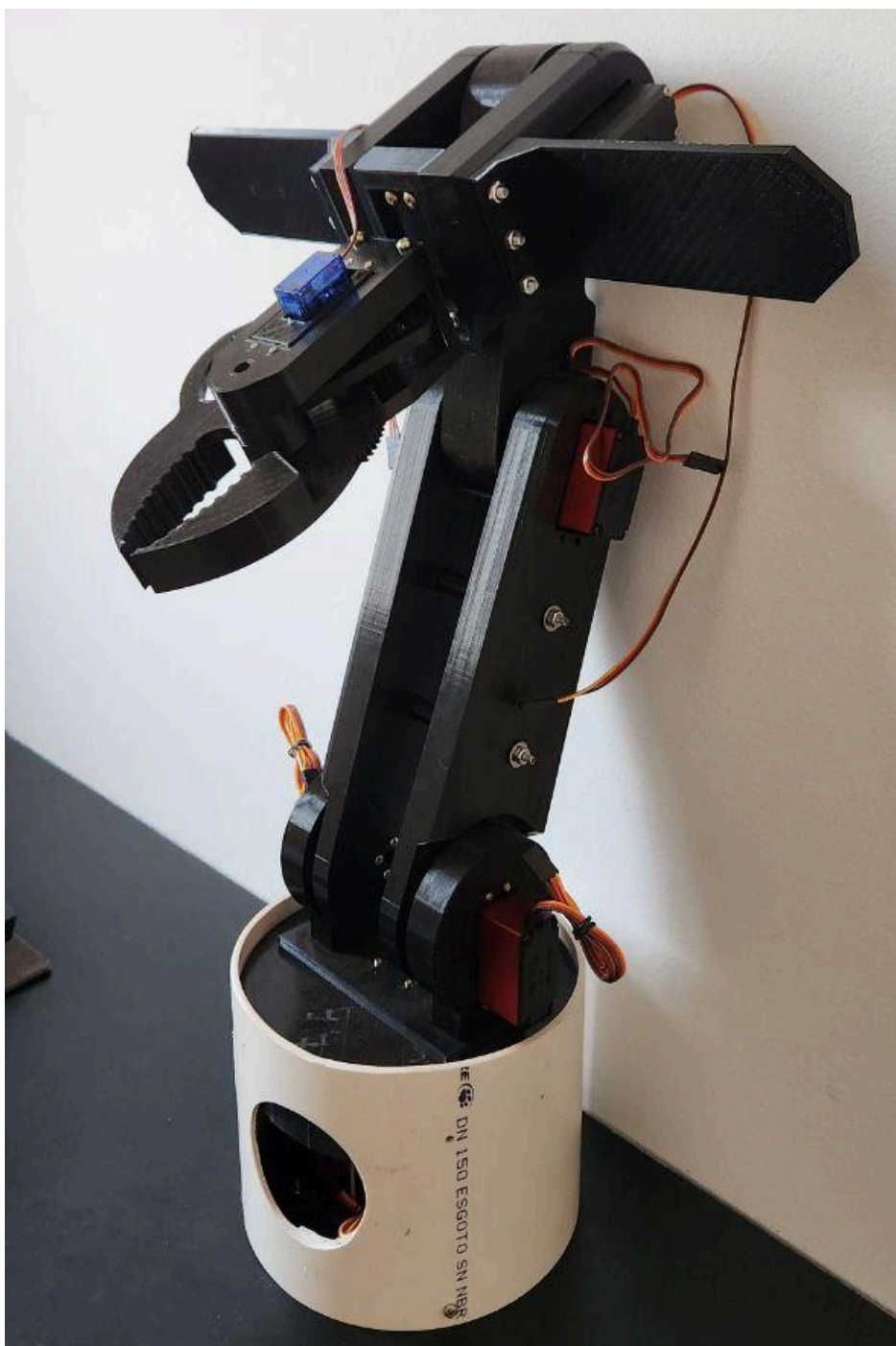
As figuras 6 e 7 exibem fotografias do manipulador robótico desenvolvido nesta monografia, elas demonstram a estrutura de um manipulador que possuiu 5 GDL (graus de liberdade) construído com 6 servos motores, o manipulador nas imagens está em modo desativado sem conexão com nenhum dos periféricos necessários para que o mesmo possa se mover.

Figura 6 - Braço robótico desligado frontal



Fonte: Elaborada pela autora.

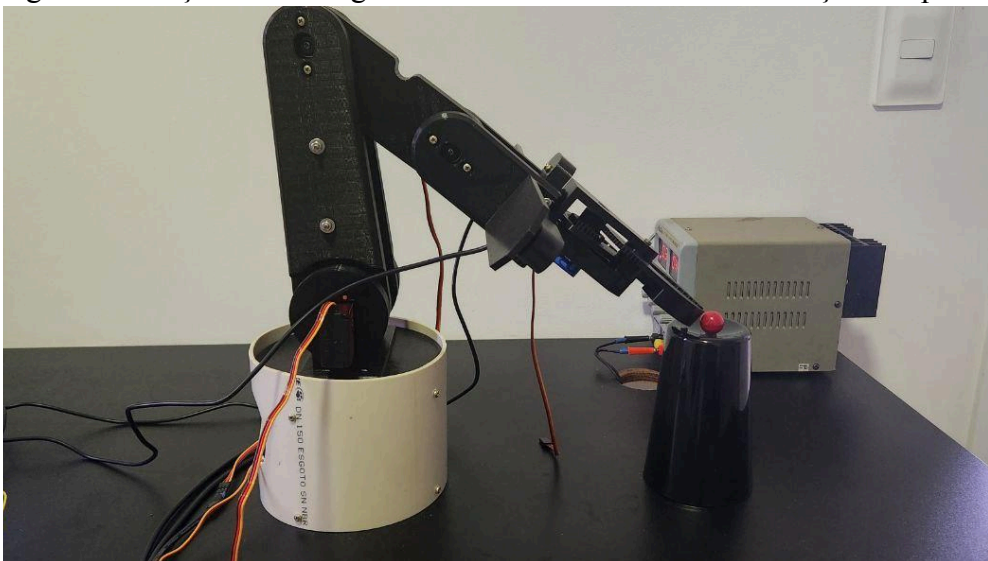
Figura 7 - Braço robótico desligado lateral



Fonte: Elaborada pela autora.

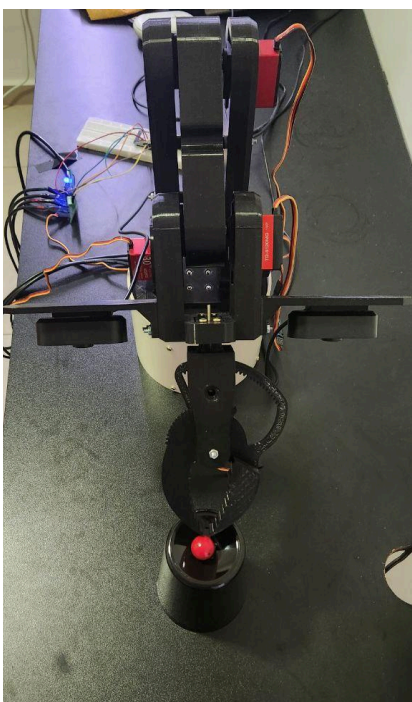
As figuras 8 e 9 exibem fotografias do manipulador robótico ativo com todos os servos motores em ângulos distintos que juntos formam as posições mostradas nas imagens, posições estas que tem como objetivo alcançar um ponto específico sendo este a esfera vermelha presente também na imagem que foi possível ser visto e identificado através das webcams implementadas no manipulador.

Figura 8 - Braço robótico ligado lateralmente simulando a detecção e captura de objetos



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 9 - Braço robótico ligado frontal simulando a detecção e captura de objetos



Fonte: Elaborada pela autora.

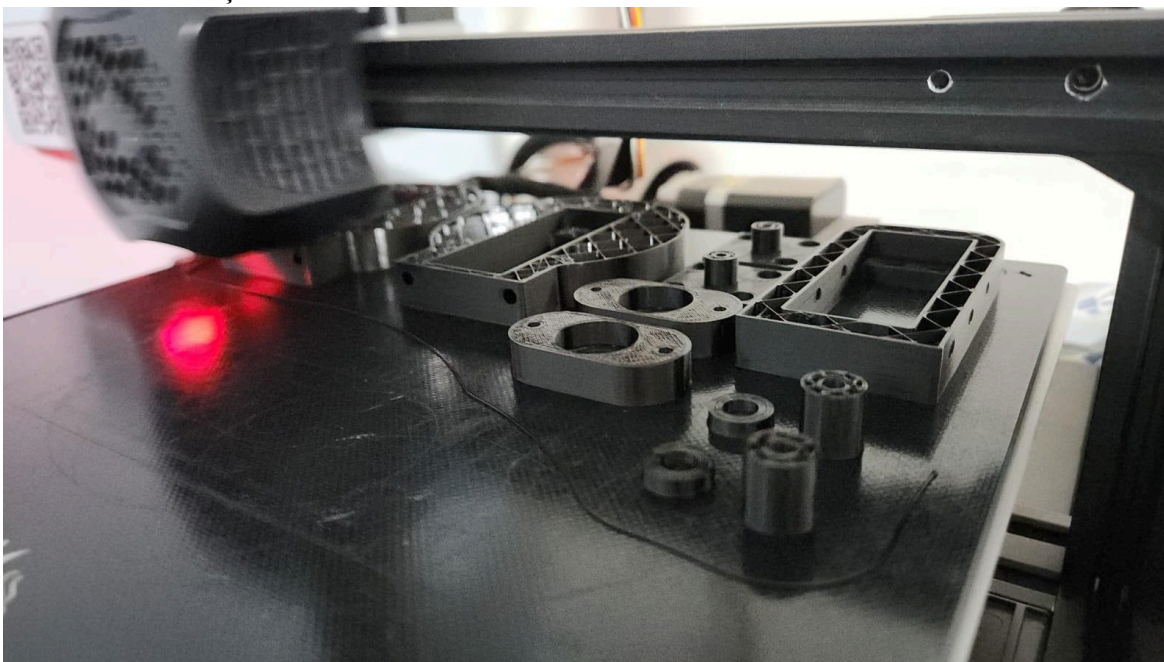
As figuras 10 e 11 exibem fotografias da impressão dos segmentos e peças que compõem a estrutura do manipulador robótico, a impressão foi feita através da impressora 3D: Ender 3 v2.

Figura 10 - Impressão 3D das peças estruturais do braço robótico



Fonte: Elaborada pela autora

Figura 11 - Impressão 3D detalhada das peças estruturais do braço robótico 3D das peças estruturais do braço robótico



Fonte: Elaborada pela autora.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido o manipulador robótico, com todas as peças fabricadas por meio de impressão 3D, e sua estrutura conta com webcams integradas. O sistema foi interligado aos demais componentes do ambiente, como o ESP32 e a placa desenvolvida para suportar a conexão dos servos que executam o movimento do manipulador. Diversas funções foram integradas, como a movimentação e a detecção de objetos com as webcams, utilizando processamento de imagem. Embora o projeto tenha alcançado um avanço considerável, dado seu alto nível de complexidade, ainda há uma série de funcionalidades e aprimoramentos que precisam ser implementados para otimizar sua operação. Em especial, aspectos como integração de sensores, melhorias no modo e na forma da movimentação do manipulador, melhorias estruturais e atualizações nas formas de comunicação com o manipulador exigem um desenvolvimento contínuo para atingir o desempenho ideal esperado. O projeto, portanto, continua a evoluir, com novas etapas planejadas para sua conclusão e otimização.

## REFERÊNCIAS

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 04 dez. 2024.

IBM. **What is computer vision?**. Disponível em: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>. Acesso em: 04 dez. 2024.

LIAM, David. "Embedded Systems: Architecture, Programming, and Design" by Raj Kamal. **Cosmic Journal of Physics** . Volume No: 02 Issue No: 01, p: 59 - 60. 2023. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/375597807\\_Embedded\\_Systems\\_Architecture\\_Programming\\_and\\_Design\\_by](https://www.researchgate.net/publication/375597807_Embedded_Systems_Architecture_Programming_and_Design_by) Acesso em: 04 dez. 2024.

HANES, David.; SALGUEIRO, Gonzalo.; GROSSETETE, Patrick.; BARTON Rob.; HENRY, Jerome. **IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things**. 1. ed.: Cisco Press, 2017.



SICILIANO, Bruno.; KHATIB, Oussama. **Springer Handbook of Robotics**. 2. ed.: Springer, 2017.